

観測記録から同定した地震動の統計的特性と地盤の非線形性を考慮した強震動予測に関する研究

著者	佐藤 智美
号	1433
発行年	1993
URL	http://hdl.handle.net/10097/10240

氏 名	佐 藤 智 美
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 5 年 12 月 8 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 62 年 3 月 東北大学大学院工学研究科建築学専攻 前期課程修了
学 位 論 文 題 目	観測記録から同定した地震動の統計的特性と地盤の 非線形性を考慮した強震動予測に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 和泉 正哲 東北大学教授 柴田 明德 東北大学教授 杉村 義広

論 文 内 容 要 旨

近年、構造物が大型化、多種多様化するに伴い、耐震工学上考慮すべき地震動の周期範囲は広がるとともに、地震動の定量的評価が必要となってきた。一方、観測記録に基づく地震動評価の重要性が指摘され、多くのサイトで強震観測がなされている。また、断層の破壊から伝播、地盤での増幅特性に至る地震学的知見が理論的にも蓄積されてきている。しかし、耐震設計で用いられる従来の経験的な強震動予測手法は、新しい地震学的知見が活かされていないため物理的意味が希薄であり、また、理論的な強震動予測手法は、深い地盤構造が必要である他、短周期領域での予測に関して弱点を有している。

最近になって、断層の破壊による震源の物理を表現でき、かつ地盤構造を知ることなく工学的に問題となる短周期領域まで強震動が予測可能な方法である経験的グリーン関数法が提案され、いくつかの観測記録のシミュレート結果から手法の有効性が検証されている。しかし、経験的グリーン関数法には、対象とするサイトで得られた中小地震の観測記録をグリーン関数とするため、観測記録が得られていない場合に直接この手法を用いることができないという問題点、および地盤の線形性を仮定しているため地盤の非線形性が問題となるような場合には理論的には用いることができないという問題点がある。本論文では前者の問題に対しては、観測記録から同定した地震動特性をもつ統計的地震動をグリーン関数とすることで、問題を解決している。なお、本論文では、統計的地震動をグリーン関数とする経験的グリーン関数法を統計的グリーン関数法と呼んでいる。後者の問題に対しては、地盤の非線形性の影響を受けない工学的基盤で統計的グリーン関数法で強震動を予

測し、地表での強震動はこの工学的基盤での強震動に地盤の非線形性を考慮して予測することで対処する。ここでいう工学的基盤とは、対象とする地域に広く存在する堅固な地盤であり地域によってその都度考える必要がある。本論文で提案する強震動予測を適用する仙台地域での工学的基盤は、仙台地域に共通に存在する S 波速度 500m/sec 以上、N 値 50 以上の第 3 紀層上面と定義している。

なお、本論文で提案する強震動予測手法は、水平成分の S 波主要動部を対象とし、0.1~30Hz の広帯域のスペクトルおよび加速度波形をターゲットとしている。

本論文は、全文 7 章より構成されている。

第 1 章 序 論

第 1 章では、本論文の背景および目的、論文の構成について述べている。

第 2 章 本論文で提案する強震動予測手法の概要および位置づけ

第 2 章では、本論文に関連する既往の文献を調査し、本論文で提案する強震動予測手法の位置づけを明確にしている。

第 3 章 足柄平野久野地区における地盤の非線形性の同定

第 3 章では、詳細な地盤調査や土の室内試験がなされている足柄平野久野地区の約 100m に至るボアホールで観測された強震動（本震）と弱震動（前震）を用いて、一次元波動論に基づく地中に対する地表のスペクトル比と観測記録のスペクトル比の残差が最小になるように、非線形最小二乗法で表層地盤の S 波速度と減衰定数を同定している。この同定により、剛性低下曲線・減衰増大曲線で特徴付けられる地盤の非線形性の定量的評価を行っている。その結果、地表で約 220gal の強震動の主要動部 3 秒間には有効ひずみで 10^{-3} レベルの地盤の非線形性がみられることを示した。そして、この観測記録から同定された地盤の非線形性が、土の室内試験結果に基づく土のミクロな非線形性とほぼ対応し、室内試験結果に基づく等価線形解析手法で強震動の地表観測記録がほぼ説明できることを示した。

第 4 章 仙台地域における工学的基盤波の推定および工学的基盤波の経時特性

第 4 章は、大きく分けると 2 つの内容から構成される。はじめに、約 20km 内に位置する仙台地域 12 観測点のボアホールで観測された 18 地震の工学的基盤レベルと地表の記録から、筆者等が提案してきた理論と観測のスペクトルに同じ平滑化を施す手法を取り入れた第 3 章と同様の地盤定数の同定手法で、個々のスペクトル比毎に S 波速度と周波数依存型減衰を同定した。個々の同定値を用いることにより、工学的基盤波を一次元波動論により精度よく推定することができた。また、 $h = h_0 f^n$ の形で同定された減衰 h は n の平均値が 10 観測点で 0.46~1.16 の周波数依存性がみられた。

次に、工学的基盤波の経時特性について検討した。経時特性を Jennings 型包絡形でモデル化し、モデルパラメータである立ち上がり部の継続時間 t_b-t_a 、強震部の継続時間 t_c-t_b 、減衰部の継続時

間 t_d-t_c を非線形最小二乗法により同定し、同定値の回帰分析を行い統計的経時特性を求めている。立ち上がり部の継続時間、強震動部の継続時間は理論的な断層の破壊時間と対応することを示し、気象庁マグニチュード M_J を説明変数として回帰分析を行った。減衰部の継続時間は、はじめに M_J と震源距離 X で回帰分析を行い回帰係数の検定を行った結果、 M_J は説明変数として不要である結果が得られたため、震源距離 X のみを変数として回帰分析を行った。回帰結果を次式に示す。

$$\log(t_b-t_a)=0.229 M_J-1.112 \quad (\text{標準偏差}0.255, \text{相関係数}0.662)$$

$$\log(t_c-t_b)=0.433 M_J-1.936 \quad (\text{標準偏差}0.255, \text{相関係数}0.662)$$

$$\log(t_d-t_c)=0.778\log X-0.340 \quad (\text{標準偏差}0.222, \text{相関係数}0.753)$$

第5章 仙台地域における工学的基盤波のスペクトル特性

第5章では、工学的基盤波のスペクトルを、地震学的知見を反映したモデルでモデル化してモデルパラメータを同定し、同定された震源特性のパラメータを地震モーメントで回帰分析することで、統計的スペクトルモデルを求めている。スペクトルモデルは、震源スペクトルを ω^{-2} モデルとし、加速度スペクトルが平坦特性から減少特性へ移る周波数 f_{max} の影響と、 Q 値による減衰及び幾何減衰を考慮した Boore のモデルに、本論文では、地震基盤から工学的基盤までの増幅率を考慮していることが特徴である。また、スペクトルのモデルパラメータを段階的に同定する新しい手法により、地震基盤から工学的基盤までの増幅率、 Q 値、 f_{max} より高周波数領域でのスペクトルの傾き、地震毎のコーナー周波数、 f_{max} 及び Harvard CMT solution が得られていない $M_J < 5.3$ の7地震の地震モーメントといった多くのパラメータを同定することが可能となっている。

同定された地震基盤から工学的基盤までの増幅率は、0.1Hz で約1倍、1Hz で約5倍、30Hz で約3倍の増幅率をもち、深い地盤構造を仮定した一次元波動論に基づく増幅率と整合することを示した。本同定手法によれば、地震基盤から工学的基盤までの深い地盤構造を直接知ることなくその増幅特性を推定することができ、その意義は大きい。また、同定された Q 値 $110.3 f_0^{-0.69}$ は、関東・東北地方太平洋岸で推定されている既往の結果とほぼ整合し、散乱理論から推定される Q 値の周波数依存性とも約1Hz以下でよく合うことを示した。地震モーメントとコーナー周波数の関係では、地震モーメントが 10^{20} dyne・cm レベルと推定された1つの小地震については、既往の研究で指摘されているように地震モーメント M_0 がコーナー周波数 f_0 の-3乗に比例するという関係から外れることを示した。この地震を除き、 M_0 が f_0 の-3乗に比例するとして得られた回帰結果は、 $\log M_0 = -3\log f_0 + 24.171$ (標準偏差0.167, 相関係数0.93) となった。この結果は、 $M_J < 6.0$ の福島県沖の地震の既往の結果とほぼ対応し、Brune モデルから推定されるストレスドロップも平均で約200barと地域特性を反映していることを示した。また、 f_{max} の地震モーメント依存性は弱く、回帰係数の検定の結果、地震モーメント依存性を考えない13.5Hz (標準偏差0.0970) の一定値で説明できることを示した。地震モーメント M_0 あるいは気象庁マグニチュード M_J のどちらかが与えられればスペクトルが定義できるようにするために、 M_0 と M_J との関係を回帰分析によって求めた。その結果、 $\log M_0 = 1.605 M_J + 15.507$ (標準偏差0.145, 相関係数0.988) となり、日本の多くの地震から推定されている結果とほぼ合っていることを示した。また、観測スペクトルとモデルスペク

トルとの地震毎の残差を推定した結果、 $M_J > 6.0$ の地震には ω^{-2} モデルからやや外れる傾向がみられたが、その偏差は小さかった。

第6章 仙台地域における強震動予測

第6章では、実際に仙台地域での強震動を予測している。想定地震は、1978年宮城県沖地震と、1962年宮城県北部地震と同じ規模をもつ仙台地域近傍の内陸型地震である。この章での強震動予測は、大きく分けると2つのステップからなる。

第1ステップでは、第4章と第5章で推定された統計的経時特性と統計的スペクトルモデルから、仙台地域での中小地震動特性を反映した統計的地震動を作成し、それをグリーン関数とした統計的グリーン関数法により工学的基盤での強震動を予測している。統計的地震動のばらつきを震源特性のばらつきと工学的基盤でのサイト特性によるばらつきに分離し、各断層要素に回帰結果に基づく震源特性のばらつきを考慮して予測された強震動のばらつきは、工学的基盤でのサイト特性による強震動のばらつきと比較して小さいことを示した。また、工学的基盤でのサイト特性のばらつきによる強震動の予測のばらつきは、標準偏差で見ると、加速度で平均値の約1.6倍と $1/1.6$ 倍であることを示した。

第2ステップでは、工学的基盤で予測された強震動に地盤の非線形性を考慮して、地表での強震動を予測している。はじめに、第3章で用いた足柄平野久地区の記録を用いて、本論文で提案する周波数依存型減衰をもつ等価線形解析手法の妥当性を検証した。さらに、1978年宮城県沖地震の際に塩竈港で観測された強震動をシミュレートし、本論文の強震動予測手法の妥当性を検証した。最後に、2つの想定地震の地表での強震動を地盤の非線形性を考慮した場合と考慮しない場合について予測し、想定宮城県沖地震では、地盤の非線形性を考慮した方が観測記録の最大加速度や建物被害分布、墓石転倒率等を説明できることを示した。また、想定内陸型地震では想定宮城県沖地震と同程度の強震動が予測されることを示した。

第7章 結 論

第7章では、本論文の結論と今後の課題について述べている。

審 査 結 果 の 要 旨

世界屈指の地震国である日本においては、建築構造物の設計にあたり、将来発生すると考えられる地震動の性格を予測し、これに耐える構造とすることが重要である。しかしながら従来の経験的な強震動予測手法には、新しい地震学的知見が十分には生かされておらず、また、日本の多くの都市は軟弱地盤上にあるにもかかわらず、強震時に問題となる地盤の非線形性については未だ不明確な部分が残されている。本論文は、地盤の非線形性を定量的に評価すると共に、地震学的知見を取り入れて地震動をモデル化し、多くの地震観測記録からモデルパラメータを同定することで地震動特性を統計的に抽出し、この統計的地震動と地盤の非線形性を考慮した定量的な強震動予測手法を提案したものであり、全7章より構成されている。

第1章は序論である。

第2章では、本論文に関連する既往の文献を調査し、本論文で提案する強震動予測手法の位置づけを明確にしている。

第3章では、足柄平野久野地区のボアホールで観測された強震動と弱震動を用いて、表層地盤のS波速度と減衰定数を同定し、地盤の非線形性の定量的評価を行っている。その結果、観測記録から同定された地盤の非線形性が、室内土質試験結果とほぼ対応することから、室内試験結果の利用の妥当性を検証している。さらに主要動後の減衰が低下せず、これが散乱波の混在等によることを指摘している。

第4章では、仙台地域12観測点のボアホールで観測された18地震の記録から、仙台地域に共通の基礎が露頭していると仮定したときの波（工学的基盤波）を推定している。そして、工学的基盤波の経時特性をJennings型包絡形でモデル化し、モデルパラメータを同定し同定値の回帰分析を行うことで統計的経時特性を求めている。この結果、変動係数の小さな工学的基盤波の推定が可能となった。第5章では、工学的基盤波のスペクトルを、地震学的知見を反映してモデル化し、モデルパラメータを同定し同定値を回帰分析することで統計的スペクトルモデルを求めている。第4章の統計的経時特性と第5章の統計的スペクトルモデルの両者から、地域性を反映した統計的地震動の作成が可能であることを示した。

第6章では、本論文で提案した強震動予測手法を仙台地域に適用している。具体的には、1978年宮城県沖地震を想定し、統計的地震動をグリーン関数とした経験的グリーン関数法により工学的基盤での強震動を予測し、周波数依存型減衰をもつ等価線形解析手法で地表での強震動を予測している。予測結果が、観測記録や建物被害分布、墓石転倒率等と整合することを示し、本論文の強震動予測手法の妥当性を検証している。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、観測記録から同定した地震動の統計的特性と地盤の非線形性を考慮した新しい強震動予測手法を提案したものであり、今後の強震動予測さらには設計用入力地震動の評価の分野において建築構造学ならびに耐震工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。